



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

ATLAS 上双光子末态希格斯 CP
测量及 CEPC 电磁量能器重建算法

作者姓名: 郭方毅

指导教师: 姜辛丑 研究员 中国科学院高能物理研究所

方亚泉 研究员 中国科学院高能物理研究所

伍灵慧 副研究员 中国科学院高能物理研究所

学位类别: 理学博士

学科专业: 粒子物理与原子核物理

培养单位: 中国科学院高能物理研究所

2023 年 6 月

The Higgs boson CP study in diphoton channel in ATLAS
detector and the CEPC electromagnetic calorimeter
reconstruction algorithm design

A dissertation submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Natural Science
in Particle Physics and Nuclear Physics

By

Guo Fangyi

Supervisor: Professor Lou Xinchou, Professor Fang Yaquan,
Professor Wu Linghui

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

June, 2023

中国科学院大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名：

日 期：

中国科学院大学 学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：

日 期：

导师签名：

日 期：

摘 要

摘要

关键词：大型强子对撞机，ATLAS 探测器，正负电子对撞机，希格斯玻色子，CP 宇称，双光子，电磁量能器

Abstract

Abstract

Keywords: LHC, ATLAS, CEPC, Higgs boson, CP parity, diphoton, electromagnetic calorimeter

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 粒子物理学简介	1
1.2 论文总述及结构	1
第 2 章 粒子物理理论模型	3
2.1 标准模型	3
2.1.1 自发对称性破缺机制与希格斯物理	3
2.1.2 CP 宇称	3
2.2 超出标准模型的新物理	3
2.2.1 有效场论	3
第 3 章 大型强子对撞机和 ATLAS 探测器	5
3.1 大型强子对撞机	5
3.2 ATLAS 探测器 [1]	5
第 4 章 ATLAS 探测器上的粒子重建和鉴别	7
4.1 径迹重建	7
4.2 顶点重建	7
4.3 光子和电子	7
4.4 缪子	7
4.5 喷注	7
4.6 丢失横动量	7
第 5 章 ATLAS 上电磁簇射形状	9
5.1 电磁簇射形状的研究	9
5.2 基于簇射形状和拓扑簇团的光子鉴别	9
第 6 章 ATLAS 探测器上通过 VBF $H \rightarrow \gamma\gamma$ 过程测量希格斯粒 子 CP 性质	11
6.1 研究背景	11
6.2 理论模型与优化观测量	11
6.3 数据和蒙特卡洛样本	11
6.4 事例选择	11
6.5 事例分类优化	11
6.6 信号和本底参数化	11

6.7 系统误差分析	11
6.8 统计模型	11
6.9 结果与总结	11
第 7 章 CEPC 上粒子流量能器概念设计	13
7.1 环形正负电子对撞机 (CEPC) 项目	13
7.1.1 物理目标	13
7.1.2 CEPC 加速器	13
7.1.3 CEPC 基准探测器	13
7.1.4 CEPC 软件环境	13
7.2 CEPC 第四代探测器概念设计	13
第 8 章 晶体电磁量能器重建算法的开发	15
8.1 探测器几何搭建	15
8.2 数字化	15
8.3 重建流程	15
8.4 物理对象的重建	15
8.4.1 最小电离粒子 (MIP)	15
8.4.2 电磁簇射	15
8.4.3 强子簇射	15
8.4.4 喷注重建	15
第 9 章 CEPC 上 $\sigma(ZH) \times Br(H \rightarrow \gamma\gamma)$ 测量精度的研究	17
9.1 研究背景	17
9.2 模拟样本	17
9.3 多变量分析	17
9.4 信号与背景建模	17
9.5 CEPC 上初步系统误差分析	17
9.6 统计模型	17
9.7 结果	17
9.8 电磁量能器能量分辨的影响	17
9.9 总结	17
第 10 章 总结	19
附录 A 附录	21
参考文献	23
致谢	25
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	27

图形列表

表格列表

符号列表

字符

Symbol	Description	Unit
I_{ij}	identity tensor	1

算子

Symbol	Description
Δ	difference

缩写

CFD	Computational Fluid Dynamics
-----	------------------------------

第 1 章 引言

- 1.1 粒子物理学简介
- 1.2 论文总述及结构

第 2 章 粒子物理理论模型

2.1 标准模型

2.1.1 自发对称性破缺机制与希格斯物理

2.1.2 CP 宇称

2.2 超出标准模型的新物理

2.2.1 有效场论

第 3 章 大型强子对撞机和 ATLAS 探测器

3.1 大型强子对撞机

3.2 ATLAS 探测器 [\[1\]](#)

第 4 章 ATLAS 探测器上的粒子重建和鉴别

- 4.1 径迹重建
- 4.2 顶点重建
- 4.3 光子和电子
- 4.4 缪子
- 4.5 喷注
- 4.6 丢失横动量

第 5 章 ATLAS 上电磁簇射形状

- 5.1 电磁簇射形状的研究
- 5.2 基于簇射形状和拓扑簇团的光子鉴别

第 6 章 ATLAS 探测器上通过 $\text{VBF } H \rightarrow \gamma\gamma$ 过程测量希格斯粒子 CP 性质

- 6.1 研究背景
- 6.2 理论模型与优化观测量
- 6.3 数据和蒙特卡洛样本
- 6.4 事例选择
- 6.5 事例分类优化
- 6.6 信号和本底参数化
- 6.7 系统误差分析
- 6.8 统计模型
- 6.9 结果与总结

第 7 章 CEPC 上粒子流量能器概念设计

7.1 环形正负电子对撞机 (CEPC) 项目

7.1.1 物理目标

7.1.2 CEPC 加速器

7.1.3 CEPC 基准探测器

7.1.3.1 粒子流探测器

7.1.4 CEPC 软件环境

7.1.4.1 模拟数据

7.1.4.2 粒子流重建算法

7.2 CEPC 第四代探测器概念设计

第 8 章 晶体电磁量能器重建算法的开发

8.1 探测器几何搭建

8.2 数字化

8.3 重建流程

8.4 物理对象的重建

8.4.1 最小电离粒子 (MIP)

8.4.2 电磁簇射

8.4.3 强子簇射

8.4.4 喷注重建

第 9 章 CEPC 上 $\sigma(ZH) \times Br(H \rightarrow \gamma\gamma)$ 测量精度的研究

- 9.1 研究背景
- 9.2 模拟样本
- 9.3 多变量分析
- 9.4 信号与背景建模
- 9.5 CEPC 上初步系统误差分析
- 9.6 统计模型
- 9.7 结果
- 9.8 电磁量能器能量分辨的影响
- 9.9 总结

第 10 章 总结

附录 A 附录

参考文献

- [1] ATLAS Collaboration. The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider [J/OL]. JINST, 2008, 3: S08003. DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/S08003](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08003).

致 谢

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

作者简历：

郭方毅，新疆维吾尔自治区博尔塔拉蒙古自治州博乐市人，中国科学院高能物理研究所博士研究生。

教育经历：

2014 年 9 月——2018 年 6 月，中国科学技术大学，近代物理系，粒子物理与原子核物理专业。

2018 年 9 月——至今，中国科学院大学，中国科学院高能物理研究所，粒子物理与原子核物理专业。

已发表（或正式接受）的学术论文：

1. F. An, et al., Precision Higgs physics at the CEPC, Chin. Phys. C 43 (2019) 043002. doi:10.1088/1674-1137/43/4/043002.
2. Sha, Q., Fadol, A., Guo, F. et al. Probing Higgs CP properties at the CEPC in the $e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow l^+l^-H$ using optimal variables. Eur. Phys. J. C 82, 981

参加的研究项目及获奖情况：

